

## イメージインテンシファイアを用いた渦輪中の伝ば火炎の観察\*

森本 洋平\*<sup>1</sup>, 池田 未央\*<sup>1</sup>, 前川 拓也\*<sup>1</sup>  
石塚 悟\*<sup>2</sup> 滝 史郎\*<sup>2</sup>Observations of the Propagating Flames in Vortex Rings  
Using an Image IntensifierYouhei MORIMOTO, Mio IKEDA, Takuya MAEKAWA,  
Satoru ISHIZUKA\*<sup>3</sup> and Shiro TAKI\*<sup>3</sup> Hiroshima University, Dept. of Mechanical Engineering  
1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8527 Japan

Using a high-speed video camera with an image intensifier, observations have been made on the propagating flames in the vortex rings. From their intensified images, variations of the flame speed and the flame diameter along the vortex axis have been determined. Results show that there are four types of flame propagation, (1) steady flame propagation, (2) periodic flame propagation, (3) unsteady flame propagation, and (4) random flame propagation. The steady flame propagation occurs for the maximum tangential velocity  $V_{\theta\max} < 7$  m/s ( $Re \leq 10^4$ ) and its local flame speed is almost constant during the propagation. The periodic flame propagation is originated from the longitudinal instability of the vortex ring, which occurs around  $V_{\theta\max} \approx 7$  m/s in this experiment. (3) The unsteady flame propagation is accompanied with strong flame acceleration and deceleration, while its mean flame speed from ignition to the end is almost equal to the maximum tangential velocity. The random flame propagation occurs in turbulent vortex rings. The flame speed changes randomly. The luminous zone is quenched shortly behind the flame and its mean flame speed becomes much lower than the maximum tangential velocity.

**Key Words:** Flames, Flame Speed, Flame Propagation, Vortex Ring

## 1. ま え が き

近年, 乱流燃焼を研究するうえで, 渦中を伝ばする火炎の特性を調べるのが重要視されているが, その火炎伝ばに関する研究の結果, 火炎の伝ば速度は渦の最大周速度に密接に関係することが明らかにされている<sup>(1)~(20)</sup>.

この伝ば機構に関しては, すでに燃焼前後の質量保存, 軸方向運動量保存, 角運動量保存を考慮した火炎伝ばモデルが提出され, 回転円管内<sup>(11)</sup>や渦輪内<sup>(14)(15)</sup>の火炎速度を定量的に記述することに成功している。さらに最近, この理論は, 任意の火炎太さや火炎先端形状をも考慮した一般理論(背圧駆動形火炎伝ば機構)に拡張され<sup>(16)</sup>, メタン・空気混合気およびプロパン・空気混合気の渦輪内を伝ばする火炎の速度が, 渦心半径方向の膨張を仮定した理論値にほぼ一致することが明らかにされている<sup>(17)(18)</sup>.

ところで, 渦輪内を伝ばする火炎の伝ば速度は, シュリーレン法を用いて可視化し, 高速度カメラで撮影

することにより求めるのが一般的であるが<sup>(5)(12)~(15)(17)(18)(21)(22)</sup>, この方法では光学的な制約により, 渦輪をその進行方向に対して正面から影響することが不可能である。そのため火炎の伝ば速度は, 火炎が渦輪の1/2周, あるいは1/4周を伝ばする間の平均速度として求めざるを得なかった<sup>(14)(15)(17)(18)</sup>.

本研究では, 新たにイメージインテンシファイアを用いて火炎を正面から撮影し, その局所的な速度を求めることにした。

## 2. 実験装置および実験方法

本実験で用いた装置の概略を図1に示す。渦輪は, 圧力駆動形ピストンによりシリンダ内の可燃性混合気をオリフィスから噴出させることにより作った。伝ば過程を詳細に調べるべく, シリンダ内径は160 mmと従来<sup>(14)(15)(17)(18)</sup>のものより大きくなっている。可燃性混合気としては当量比1.0のプロパン・空気混合気を用いた。渦輪の強さを変えるために内径 $D_0 = 90, 70, 60, 50$  mmの4種類のオリフィス板を取り替えて使用するとともに, ピストン駆動圧 $P$ も0.4, 0.6, 0.8, 1.0 MPaの4段階に設定を変えて渦輪を作った。

渦輪直径, 火炎伝ば速度および火炎太さは, 火炎か

\* 原稿受付 2000年2月21日。

\*<sup>1</sup> 広島大学大学院(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)。\*<sup>2</sup> 正員, 広島大学工学部。

E-mail: ishizuka@mec.hiroshima-u.ac.jp

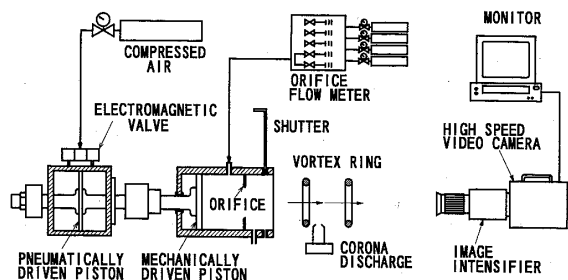


Fig. 1 Experimental apparatus

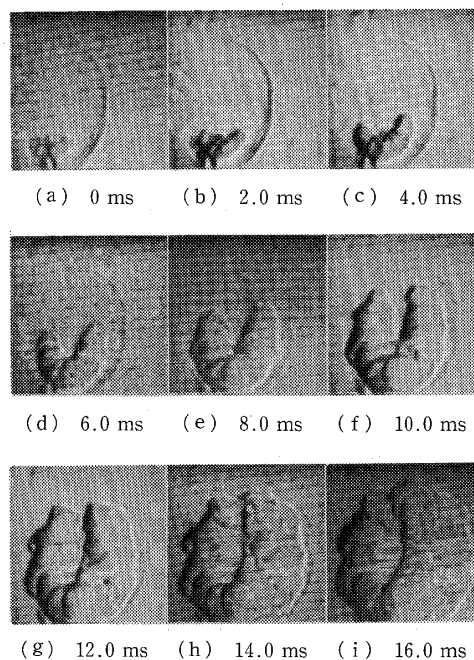
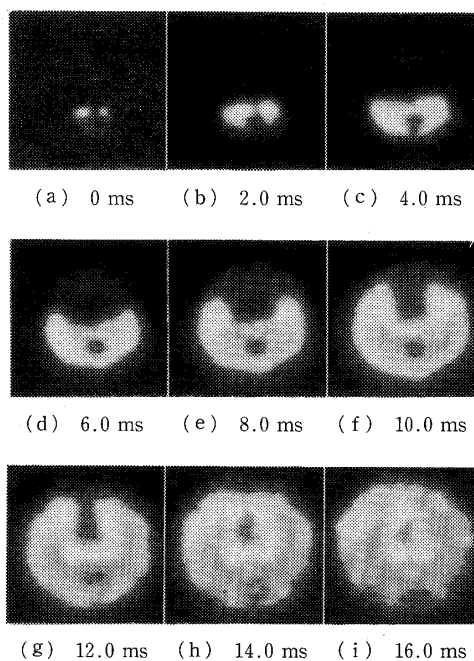
らの発光をイメージインテンシファイアにより増幅、可視化し、高速度ビデオカメラ(ナック, MEMRECAMci, 最大2000コマ/s)で撮影することにより求めた。また渦輪の最大周速度  $V_{\theta\max}$  は、空気の渦輪を対象に、各オリフィス内径  $D_0$  および駆動圧  $P$  に対して熱線流速計を用いて求めた<sup>(14)(15)</sup>。

### 3. 実験結果

**3.1 伝ば火炎外観** 当量比1.0のプロパン・空気混合気の渦輪内を伝ばする火炎の様子を図2, 3に示す。図2はシュリーレン法により可視化した映像で、図3がイメージインテンシファイアにより可視化した映像である。なお、図3では、コロナ放電による撮像管の焼損を防ぐため、イグナイタ付近が黒く遮へいされている。

さて一般に、火花電極により着火すると [図2(a), 3(a)], 先端のとがった二つの火炎が形成され [図2(b), 3(b)], これが渦心に沿って二手に分かれて伝ばしていき [図2(c)~(h), 3(c)~(h)], 反対側で再び出会う [図2(i), 3(i)]. シュリーレン法による映像(図2)は、渦輪の進行方向に対して約30°斜めからの撮影<sup>(14)</sup>であるのに対し、イメージインテンシファイアによる映像は、渦輪の進行方向に対して正面からの撮影であるため、火炎速度の渦心に沿つての変化が正確に測定できることがわかる。

このイメージインテンシファイアの画像をもとに、局所の火炎伝ば速度  $V_f$  の値のほか、火炎が渦輪の1/2周を伝ばする間の平均火炎伝ば速度  $V_{f,\text{mean}}$  および渦心垂直方向の燃焼範囲に関するパラメータ  $k$ <sup>(16)(17)</sup>の影響を調べるため、火炎先端から後方の燃焼ガスの太さがほぼ一定になったところを火炎太さ  $d_f$  として定義し、測定を行った。 $d_f$ の決定には、ディスプレイの輝度、イメージインテンシファイアのゲインなどにより任意性があるが、伝ばの定常性や燃焼範囲の影響を少なくとも定性的に議論するうえで有用と考えられる。

Fig. 2 Schlieren sequence of the vortex ring combustion ( $D_0=60$  mm,  $P=0.4$  MPa)Fig. 3 Time sequence of the intensified images of the vortex ring combustion ( $D_0=60$  mm,  $P=0.4$  MPa)

**3.2 火炎伝ば速度および火炎太さ** はじめに、最大周速度  $V_{\theta\max}$  と火炎が着火してから伝ば終了時までの平均火炎伝ば速度  $V_{f,\text{mean}}$  の関係を求めた。その結果を図4に示す。図4の上には、火炎太さ  $d_f$  とランキン渦を仮定して求められる渦核直径  $d_c$ <sup>(14)(15)(17)(18)</sup>との比  $d_f/d_c$  の変化も同時に示してある。図4中の

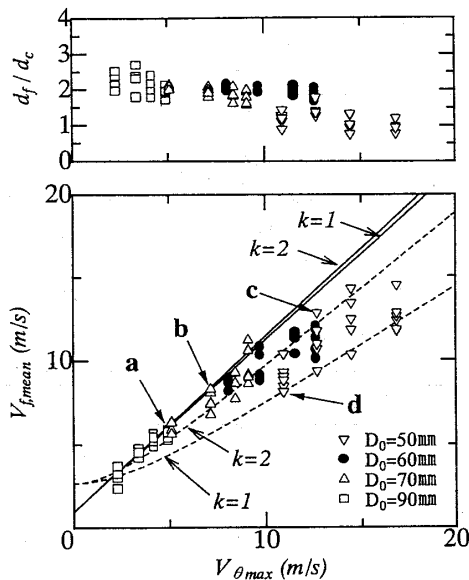


Fig. 4 Variations of the mean flame speed  $V_{f,mean}$  and the flame/core diameter ratio  $d_f/d_c$  with the maximum tangential velocity  $V_{\theta,max}$  (solid lines and broken curves: lateral expansion and axial expansion in the back-pressure drive flame propagation mechanism, respectively)

実線および破線は、背圧駆動形火炎伝ば機構による理論式<sup>(16)(17)</sup>で、前者が渦心半径方向のみの膨張を、後者が渦心軸方向のみの膨張を仮定した理論式である。図4中の理論式の算出にあたっては、燃焼速度  $S_u = 46.2$  cm/s, 面積比  $Y = 2$  (半球状), 密度比  $\rho_u/\rho_b = 8.236$  の値を用いた。また,  $k$  は, 燃焼する未燃ガスの半径と剛体渦の半径との比で,  $k=1$  は剛体渦の部分が燃焼することを,  $k=2$  はその2倍の半径まで燃焼することを意味する。

いちばん大きなオリフィス径  $D_0 = 90$  mm (□印) の場合, 平均火炎伝ば速度  $V_{f,mean}$  は渦心半径方向のみの膨張を仮定した理論式(実線)にほぼ一致しているが, 実験値のほうが若干高くなっている。また, 火炎太さと渦核直径の比  $d_f/d_c$  は, ばらつきはあるものの, 2前後と大きく, 最大周速度  $V_{\theta,max}$  の増加とともに徐々に減少する傾向が見られる。

オリフィス径  $D_0 = 70$  mm (△印) の場合でも, 平均火炎伝ば速度  $V_{f,mean}$  は多少ばらつくが, 渦心半径方向のみの膨張を仮定した理論式によく一致している。 $d_f/d_c$  の値についても傾向は変わらず, 最大周速度  $V_{\theta,max}$  の増加とともに徐々に減少している。

さらにオリフィス径が 60 mm (●印) と小さくても, 火炎速度はやはり渦心半径方向のみの膨張を仮定した理論式に比較的一致しているが, 最大周速度

$V_{\theta,max}$  の増加に伴い平均火炎伝ば速度  $V_{f,mean}$  の値が理論式から徐々に低下する。一方  $d_f/d_c$  の値は, 変化量はごく小さいが, 最大周速度  $V_{\theta,max}$  の増加に伴って徐々に減少している。

今回の実験でいちばん小さい  $D_0 = 50$  mm のオリフィス(▽印)になると, 平均火炎伝ば速度  $V_{f,mean}$  のばらつきが非常に大きくなり, その値も半径方向のみの膨張を仮定した理論式から急激に下降し, むしろ渦心軸方向のみの膨張を仮定した理論式(破線)に近い値となる。また  $d_f/d_c$  の値も他のオリフィスと比べて極端に小さくなっており, 最大周速度  $V_{\theta,max}$  の増加に伴い徐々に減少する。 $D_0 = 90, 70, 60$  mm の場合と比べて,  $D_0 = 50$  mm の場合, 最大周速度  $V_{\theta,max}$  および  $d_f/d_c$  の値の傾向が大きく異なっており, 最大周速度  $V_{\theta,max}$  の値が約 15 m/s を超えると, 平均火炎伝ば速度  $V_{f,mean}$  は増加できなくなって飽和する傾向が見られる。

以上, 平均火炎伝ば速度  $V_{f,mean}$  は最大周速度  $V_{\theta,max}$  の増加とともにほぼ直線的に増加するが,  $V_{\theta,max}$  が約 15 m/s を超えると, 平均火炎伝ば速度  $V_{f,mean}$  は落ち込み,  $d_f/d_c$  の値も低下するという結果を得た。この傾向は, 以前に内径 100 mm のピストンとシリンダを用いた実験結果<sup>(14)(15)(17)(18)</sup>と一致している。

そこで, 次に, この変化の詳細を明らかにするため, 渦心に沿っての局所的な火炎伝ば速度  $V_f$  の変化と火炎太さと渦核直径の比  $d_f/d_c$  の変化を詳しく求めることにした。

### 3.3 火炎伝ば速度および火炎太さの時間変化

すべての条件(オリフィス径  $D_0 = 90, 70, 60, 50$  mm およびピストン駆動圧  $P = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$  MPa)について, 火炎が伝ばを開始してから再び出会うまでの1こま(0.5 ms)ごとの火炎伝ば速度  $V_f$ , および, 火炎太さと渦核直径の比  $d_f/d_c$  の変化を測定した。その結果, 火炎伝ば速度  $V_f$  の変化には, 次のa~dの四つのパターンがあることがわかった。

- 速度一定の火炎伝ば(定常火炎伝ば)
- 周期的変動を伴う火炎伝ば
- 加速・減速を伴う火炎伝ば
- 激しい変動を伴う火炎伝ば

以下, これら四つのパターンの特徴を説明する。なお, 図5, 7, 9, 11中黒丸は渦輪の進行方向下流から, 渦輪の正面向かって左側半分, 白丸が右側半分の火炎についての伝ば速度  $V_f$  および  $d_f/d_c$  の値で, 破線は平均火炎伝ば速度  $V_{f,mean}$  の値を表している。

- 速度一定の火炎伝ば この場合の代表例として, 図4の点a( $V_{\theta,max} = 4.9$  m/s,  $V_{f,mean} = 5.9$  m/s)

における、局所的な火炎伝ば速度  $V_f$ 、および火炎太さと渦核直径の比  $d_f/d_c$  の時間変化を図5に示す。火炎速度は前半少し減少し、後半は増加するが、ほぼ一定速度(相対変化にして $\pm 30\%$ 以内)で伝ばしていることがわかる。また  $d_f/d_c$  の値についても、着火直後増加するものの、その後はほぼ一定(約1.6)となっており、火炎が一定の太さで伝ばしていることがわか

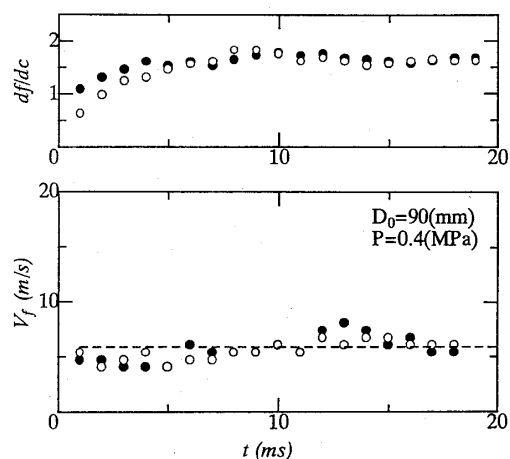


Fig. 5 Variations of the flame/core diameter ratio  $d_f/d_c$  and the local flame speed  $V_f$  with time, showing an almost constant flame speed during combustion (Fuel: Propane,  $D_0=60$  mm,  $P=0.4$  MPa,  $\Phi=1.0$ , broken line: the mean flame speed)

る。図6は、このときの映像であるが、先端形状がほぼ円すい状で発光強度も一定である。イメージインテンシファイアの映像で明るい部分は反応領域にほぼ対応しているので、火炎太さがほぼ一定になった火炎後方では、反応が終結していることがわかる。

このように、局所火炎速度  $V_f$  が一定となる火炎伝ば現象は、図4で最大周速度  $V_{0max} < 7.0$  m/s、渦輪の

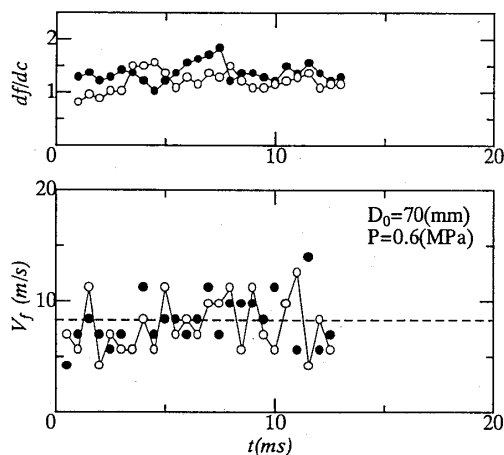


Fig. 7 Variations of the flame/core diameter ratio  $d_f/d_c$  and the local flame speed  $V_f$  with time, showing a periodic change in flame speed (Fuel: Propane,  $D_0=70$  mm,  $P=0.6$  MPa,  $\Phi=1.0$ , broken line: the mean flame speed)

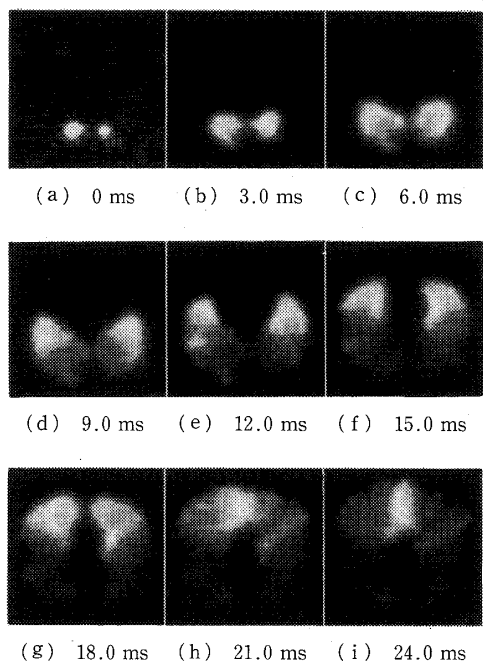


Fig. 6 Time sequence of the intensified images of the vortex ring combustion (Fuel: Propane,  $D_0=60$  mm,  $P=0.4$  MPa,  $\Phi=1.0$ )

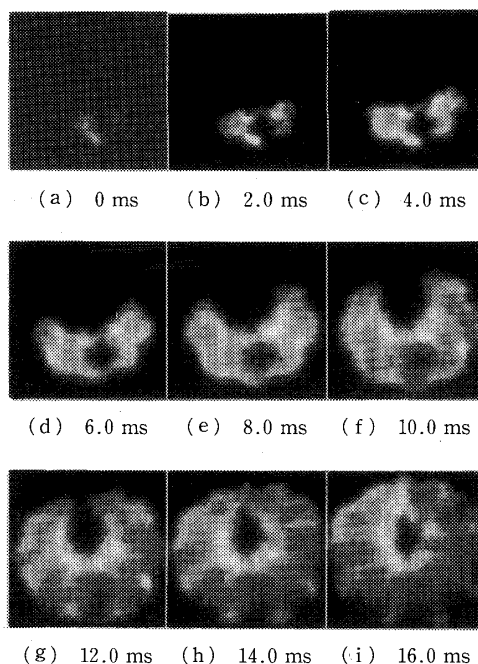


Fig. 8 Time sequence of the intensified images of the vortex ring combustion (Fuel: Propane,  $D_0=70$  mm,  $P=0.6$  MPa,  $\Phi=1.0$ )

レイノルズ数  $Re$  にして  $Re < 10^4$  (ここで,  $Re \equiv UD/\nu$ ,  $U$ : 渦輪の移動速度,  $D$ : 渦輪直径,  $\nu$ : 動粘性係数) の範囲で観察された。なお, レイノルズ数が  $10^4$  のオーダを超えるといわゆる乱流渦輪になることが知られているので<sup>(23)~(25)</sup>, 火炎速度一定の定常火炎伝ばは層流渦輪内で実現されるといえる。

b. 周期的変動を伴う火炎伝ば この場合の代表例として, 図4の点b ( $V_{\theta\max} = 7.1$  m/s,  $V_{f,\text{mean}} = 8.3$  m/s) における, 局所火炎速度  $V_f$  および  $d_f/d_c$  の値の変化を図7に, また, このときの火炎映像を図8に示す。

図7より, 局所火炎速度  $V_f$  が振動的に変化していることがわかる。また, 火炎映像より, いわゆる渦輪の周方向の不安定性<sup>(26)(27)</sup> が発生しており, その節の個数(約11個, 半周で5~6個)と, 局所火炎速度  $V_f$  のピークの個数(大きいもので5個)はほぼ等しいことから, この火炎速度の振動は, 渦輪の周方向の不安定性に起因しているものと考えられる。ただし, この場合の火炎太さは, 図8の映像でわかるように火炎先端近傍の形状が非常に複雑なため, 定義に従って単純に測定することが困難であり, 一つの試みとして火炎先端の円すい部の根元の直径で測定して  $d_f/d_c$  の値を求めてみると, 図7に示すように, 振動的な変化は現れない結果となった。

なお, 本実験において, このような振動的な火炎伝ば速度が観察されたのは, 最大周速度  $V_{\theta\max} \approx 7.0$  m/s ( $Re \approx 10^4$ ) 付近に限られた。

c. 加速・減速を伴う火炎伝ば この場合の代表例として, 図4の点c ( $V_{\theta\max} = 12.7$  m/s,  $V_{f,\text{mean}} = 12.8$  m/s) における, 局所火炎速度  $V_f$  および  $d_f/d_c$  の値の変化を図9に, また, このときの映像を図10に示す。

図9に示すように, 火炎速度は着火後急激に増加し, 左右に分かれた火炎が出会う直前に減速している。また, 図9に示した渦輪の場合,  $V_f$  の増加とともに, 図7のような振動的な変化も特に右側の火炎(○印)で現れている。一方,  $d_f/d_c$  の値は, 伝ば開始後急激に立ち上がり, その後徐々に増加して, 伝ば終了直前に再び立ち上がっている。着火後の急激な火炎伝ば速度  $V_f$  の増加は, やはり  $d_f/d_c$  の値の増加と深く関与していると考えられるが, 伝ば終了直前における火炎速度の急激な減少および,  $d_f/d_c$  の値の急激な増加の原因は, 渦心方向に激しく移動する未燃ガスが, 渦輪の上端で妨げられそのよどみ点効果が顕著に現れたためと考えられる。

このような伝ばをする火炎の特徴としては, 図10

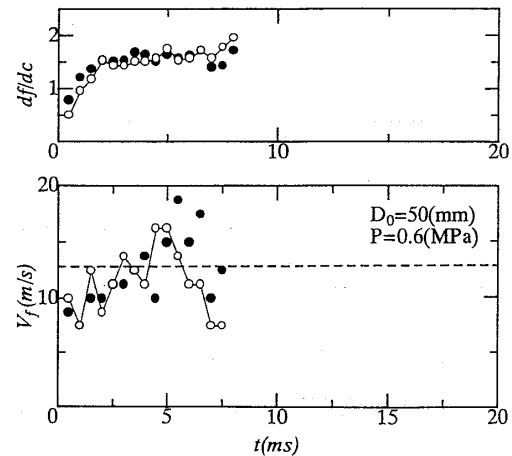


Fig. 9 Variations of the flame/core diameter ratio  $d_f/d_c$  and the local flame speed  $V_f$  with time, showing acceleration and deceleration in flame speed (Fuel: Propane,  $D_0 = 50$  mm,  $P = 0.6$  MPa,  $\Phi = 1.0$ , broken line: the mean flame speed)

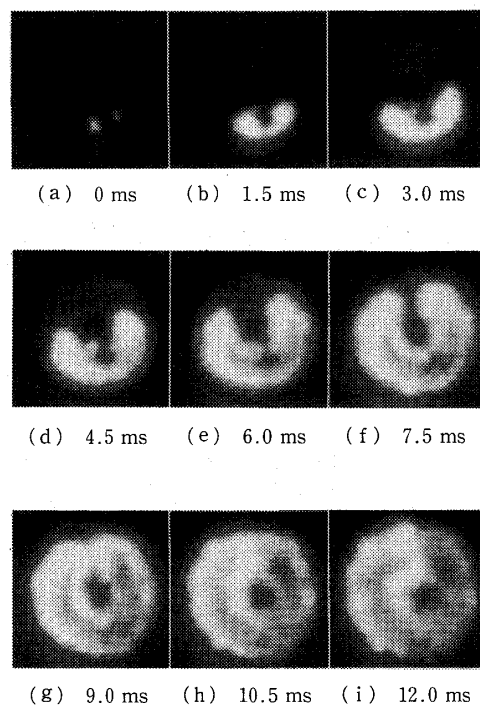


Fig. 10 Time sequence of the intensified images of the vortex ring combustion (Fuel: Propane,  $D_0 = 50$  mm,  $P = 0.6$  MPa,  $\Phi = 1.0$ )

に示されるように, 火炎が太くて, 乱れが少ないうえ, 火炎後方で発光が強い点が挙げられる。また, このような火炎伝ばは,  $D_0 = 60$  mm と 50 mm のオリフィス板を用い, 最大周速度  $V_{\theta\max} > 8.0$  m/s で, なおかつ, 平均火炎伝ば速度  $V_{f,\text{mean}}$  が図4で実線で示す理論に近い場合に頻りに観察された。

d. 激しい変動を伴う火炎伝ば この場合の代表

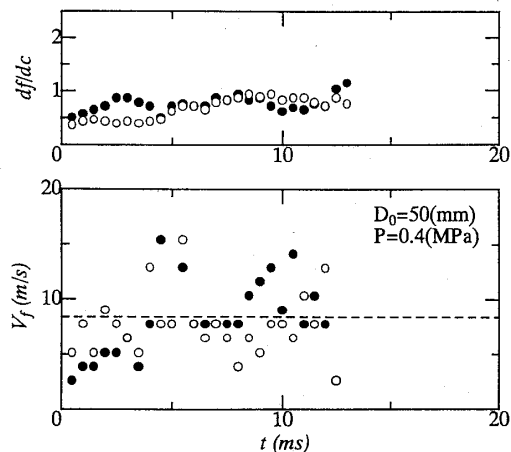


Fig. 11 Variations of the flame/core diameter ratio  $d_f/d_c$  and the local flame speed  $V_f$  with time, showing random changes in flame speed (Fuel: Propane,  $D_0=50$  mm,  $P=0.6$  MPa,  $\Phi=1.0$ , broken line: the mean flame speed)

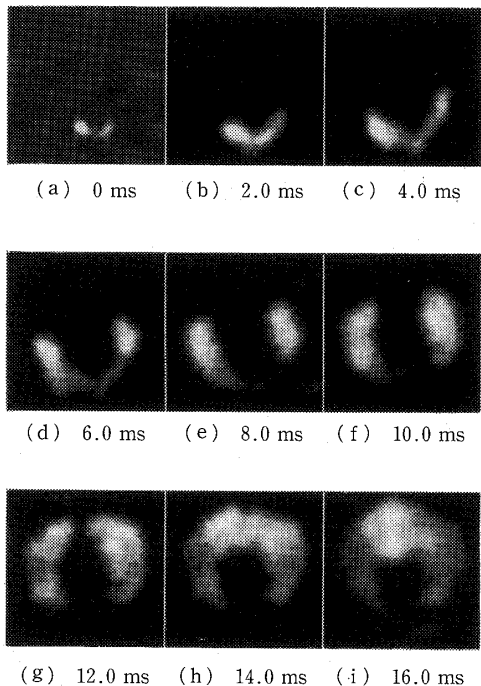


Fig. 12 Time sequence of the intensified images of the vortex ring combustion (Fuel: Propane,  $D_0=50$  mm,  $P=0.4$  MPa,  $\Phi=1.0$ )

例として、図4の点d ( $V_{\max}=10.9$  m/s,  $V_{f,\text{mean}}=8.2$  m/s)における、局所火炎速度  $V_f$  および  $d_f/d_c$  の値の変化を図11に、また、このときの火炎映像を図12に示す。

このときの局所火炎速度  $V_f$  は、図11に示されるように激しく変動する。図12の映像からもわかるように、火炎形状は大きく変動するが、火炎は概して細く、また、火炎後方では発光域が消失している。 $d_f/d_c$

$d_c$  の値は、 $d_f$  のとり方で変わってはくるが、0.4~1.0の小さな値をとる。このような火炎伝ばは、内径  $D_0=50$  mm のオリフィスを用いた場合で、かつ、平均火炎伝ば速度  $V_{f,\text{mean}}$  が図4の実線で示す半径方向の膨張を仮定した理論式より特に落ち込んでいるような場合にのみ観察された。したがって、この激しい変動を伴う火炎伝ばは、いわゆる乱流渦輪<sup>(23)~(25)</sup>に起因していると思われる。

#### 4. 考 察

以上の実験結果より、当量比1.0のプロパン-空気混合気限定されてはいるものの、渦輪のレイノルズ数  $Re$  が  $10^4$  のオーダー以下であれば、火炎がほぼ一定の速度で伝ばすることが明らかになった。従来の管内の軸方向に減衰する渦流れ<sup>(3)</sup>や回転円管内の剛体渦中<sup>(11)</sup>における研究では、点火後火炎は加速的に伝ばし、一定速度で定常的に伝ばすることはなかった。したがって、今回のイメージインテンシファイアを用いた測定により初めて、回転流が渦輪であれば定常的な火炎伝ばが可能であることが示された。

しかし、この定常的な火炎伝ばは、最大周速度  $V_{\max}$  が大きくなって周方向の不安定性が渦輪に発生すると周期的に火炎速度が変動したり(図8)、さらに  $V_{\max}$  が大きくなると加速・減速を伴う非定常性の強い火炎伝ば(図10)になり、また、特に  $V_{\max}$  が大きくなって乱流渦輪状態となると火炎速度が大きく変動し(図12)、もはや、定常的な火炎伝ばは起こり得ないことが明らかになった。

したがって、一定速度で渦中を火炎が伝ばするということが、非常に限定された条件下でのみ可能な現象であるといえる。ただし、火炎伝ばが非定常となっても、強い乱流渦輪状態となって断続的な消炎が起きなければ、伝ば開始時から終了時までの平均した火炎速度  $V_{f,\text{mean}}$  の値は、半径方向の膨張を仮定した背圧駆動形火炎伝ばモデルの理論値にほぼ一致し、すなわち、最大周速度程度の値となっている。したがって、背圧駆動形火炎伝ばモデルは、非定常現象を前提に火炎前後の運動量流束保存を仮定して出された粗い近似モデルであるが<sup>(11)</sup>、この理論でだいたいの火炎速度を把握できることがわかる。しかし、局所的な瞬間瞬間の火炎速度はこれに等しいわけではなく、図7, 9, 11を見ると、2倍ぐらい速くなることもあることがわかる。

ちなみに、背圧駆動形火炎伝ばモデルでは、燃焼する部分の未燃ガスの半径、したがって、火炎太さが小さくなるほど、また、半径方向より軸方向の膨張が起ると火炎速度が減少することが導かれている<sup>(16)</sup>。

図9の加速・減速を伴う場合、点火後火炎が太くなるに従って火炎速度が増加し、また、図11の変動伝ばの場合、左側伝ば(●印)で点火3ms後、火炎が太くなったのに呼応して火炎速度も増加し、この理論に定性的に一致するが、同じ図11左側でも、10ms付近では、火炎が細くなっているにもかかわらず火炎速度は減少せず増加し理論と一致しない。したがって、非定常項をも考慮した理論の構築が求められる。

## 5. 結 論

新たに直径160mmの渦輪発生装置を製作し、当量比1.0のプロパン-空気混合気の渦輪内を伝ばする火炎について、イメージインテンシファイアを用いて観察するとともに、渦心に沿っての火炎速度の変化を詳しく測定した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 火炎伝ばには
  - a. 速度一定の火炎伝ば(定常火炎伝ば)
  - b. 周期的変動を伴う火炎伝ば
  - c. 加速・減速を伴う火炎伝ば
  - d. 激しい変動を伴う火炎伝ば

の四つのパターンがある。

(2) 速度一定の火炎伝ばは、最大周速度  $V_{\theta\max} < 7.0 \text{ m/s}$  ( $Re < 10^4$ )の領域において起こり、変動幅 $\pm 30\%$ 以内の一定速度で伝ばする。

(3) 周期的変動を伴う火炎伝ばは、渦輪の周方向の不安定性に起因し、それにより火炎伝ば速度  $V_f$  が周期的に変動するもので、今回の実験では、最大周速度  $V_{\theta\max} \approx 7.0 \text{ m/s}$  ( $Re \approx 10^4$ ) 付近の領域で生じた。

(4) 加速・減速を伴う火炎伝ばは、最大周速度  $V_{\theta\max} > 8.0 \text{ m/s}$  の領域で起き、火炎の十分後方でも反応を伴い、伝ば開始から終了までの平均火炎速度は半径方向の膨張を仮定した背圧駆動形火炎伝ばモデルの理論値(ほぼ最大周速度に等しい値となる)に近い値となる。

(5) 激しい変動を伴う火炎伝ばは、いわゆる乱流渦輪に起因しており、火炎は細く、また、火炎後方で反応域が消失しているのが特徴である。このときの平均火炎伝ば速度  $V_{f,\text{mean}}$  は最大周速度に比べ大きく落ち込む。

本研究は、矢崎科学技術振興財団の研究補助金を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表す。ま

た、実験の遂行にあたりご協力いただいた本学大学院 院生 長谷川亮 [現:パロマ(株)], 甲村公典 [現: 本田技研(株)] 両君にも感謝の意を表す。

## 文 献

- (1) Chomiak, J., *Proc. 16th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, Pittsburgh, (1976), 1665-1673.
- (2) Daneshyar, H. and Hill, P. G., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **13** (1987), 47-73.
- (3) Ishizuka, S., *Combust. Flame*, **87** (1990), 176-190.
- (4) Ishizuka, S. and Hirano, T., *Prog. Astro. Aero.*, **151** (1993), 284-306.
- (5) Asato, K., Takeuchi, Y. and Wada, H. *Proc. Russ. Jpn. Seminar Combust.*, The Russian Section of The Combustion Institute, Moscow, (1993), 73-76.
- (6) Atobilye, R. Z. and Britter, R. E., *Combust. Flame*, **98** (1994), 220-230.
- (7) 石塚悟・平野敏右, 燃焼の科学と技術, **2** (1994), 15-26.
- (8) Hasegawa, K., Nishikado, K. and Chomiak, J., *Combust. Sci. Technol.*, **108** (1995), 67-80.
- (9) Ashurst, Wm. T., *Combust. Sci. Technol.*, (1996), 175-185.
- (10) Hasegawa, K. and Nishikado, K., *Proc. 26th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, Pittsburgh, (1996), 291-297.
- (11) Sakai, Y. and Ishizuka, S., *Proc. 26th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, Pittsburgh, (1996), 847-853.
- (12) 安里勝雄・竹内秀隆・和田秀忠, 機論, **63**-605, B (1997), 317-322.
- (13) Asato, K., Wada, H., Himura, T. and Takeuchi, Y., *Combust. Flame*, **110** (1997), 418-428.
- (14) Ishizuka, S., Murakami, T., Hamasakai, T., Koumura, K. and Hasegawa, R., *Combust. Flame*, **113** (1998), 542-553.
- (15) 村上高広・濱崎拳志・石塚悟・滝史郎, 機論, **64**-620, B (1998), 1209-1215.
- (16) 濱崎拳志・石塚悟, 燃焼の科学と技術, **6** (1999), 195-205.
- (17) Ishizuka, S., Hamasaki, T., Koumura, K. and Hasegawa, R., *Proc. 27th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, Pittsburgh, (1999), 727-734.
- (18) 濱崎拳志・長谷川亮・甲村公典・石塚悟・滝史郎, 機論, **65**-636, B (1999), 2881-2897.
- (19) 梅村章・富田浩一, 機論, **65**-636, B (1999), 3169-3176.
- (20) 梅村章・富田浩一, 機論, **65**-636, B (1999), 3177-3184.
- (21) McCormack, P. D., *Proc. Royal Irish Academy*, **71** A (1971), 73-83.
- (22) McCormack, P. D., Scheller, K., Muller, G. and Tisher, R., *Combust. Flame*, (1972), 297-303.
- (23) Maxworthy, T., *J. Fluid Mech.*, **51** (1972), 15-32.
- (24) Maxworthy, T., *J. Fluid Mech.*, **64** (1974), 227-239.
- (25) Maxworthy, T., *J. Fluid Mech.*, **81** (1977), 465-495.
- (26) Sullivan, J. P., Windnall, S. E. and Ezebiel, S., *AIAA J.*, **11** (1973), 1384-1389.
- (27) Windnall, S. A., Bliss, D. B. and Tsai, C. Y., *J. Fluid Mech.*, **66** (1974), 35-47.